

京都大学工学部 学 生 会 員 ○北原 秀樹
 京都大学大学院 フェロー会員 岡 二三生
 京都大学大学院 正 会 員 小高 猛司
 京都大学大学院 学 生 会 員 市之瀬知子

1.はじめに 著者らは、砂質土の中でも特にゆるづめ砂を対象として、内部構造の崩壊を伴う圧縮帯に注目し、三軸圧縮試験を通してひずみの局所化挙動を観察してきた^{1), 2)}。今年度は、新たに砂質土角柱供試体を用いた三軸圧縮試験を行い、広範な密度の砂供試体表面に現れる局所的なひずみの分布の観察を行った。角柱供試体は3次元変形場におけるひずみの局所化を観察するのに適し、3次元数値シミュレーションへの適用性も高いことはすでに正規および過圧密粘土の実験で確かめている^{3), 4)}。本報では、特にPTV画像解析システムを用いた局所的なひずみの観察手法について説明し、画像解析によって得られた結果を示す。

2.実験方法 粒径0.850mm以下に粒度調整された佐原砂から粒径0.075mm以下の細粒分を取り除いたものを基本試料($G_s=2.64$)とし、角柱砂供試体のサイズは、縦×横×高さを4×4×8(cm)とした。供試体は角柱砂供試体作製用モールド⁵⁾を用いて

表 1: 供試体の間隙比と相対密度

No.	状態	間隙比 e	相対密度 $Dr(\%)$
CU-1	Loose	1.12	6.64
CU-2	Medium Loose	1.00	42.0
CU-3	Medium Dense	0.88	75.8
CU-4	Dense	0.82	95.6

空中落下法により作製した。表1に本実験での供試体の間隙比および相対密度の一覧を示す。拘束圧50kPa、軸ひずみ0.1%/minで非排水載荷し、軸ひずみ20%で試験を終了した。

3. PTV画像解析システムによる供試体表面のひずみの局所化の観察

画像解析のためにあらかじめメンブレンに直径1mmの黒色ターゲットを2mm間隔正方形配置でプリントしておき、三軸圧縮中、軸ひずみ0.5%おきに、ターゲットをプリントした2側面を定点デジタルカメラで撮影した。撮影したデジタル写真はパソコンに入力後、PTV画像解析システムにより処理を行い、局所ひずみの観察に用いた。PTV (Particle Tracking Velocimetry)は、流体運動の可視化および流速計測を目的としたデジタル画像処理技術 PIV (Particle Image Velocimetry)の一種であり、比較的大きなトレーサ粒子を直接追跡することができる⁶⁾。本実験では、メンブレン上のターゲットをトレーサ粒子と考える。具体的な画像解析の流れを図1に示す。フローチャート中の画像処理とは、入力されたデジタル写真に対し、マスキング(画像処理の領域指定)、二値化、ラベリング(各座標の指標付けとピクセル座標の決定)を施し、基準点を用いて各粒子の実座標を決定するまでの処理を表す。なお、マスキングの領域と二値化の閾値は、初期条件の写真で決定したものをそれ以後の軸ひずみの画像処理でも用いることで一連の解析の自動化を図った。最終的に決定した各粒子の座標は、近傍の4点で正方格子を構成し、初期状態の座標からの各粒子の変位を用いて、1次の変位の内挿関数を用いて、格子内のせん断ひずみと体積ひずみを計算した。実際の変形は3次元であるが、ここでのひずみとは画像で計測される表面の2次元成分だけで考え、せん断ひずみと体積ひずみは次式のように定義した。

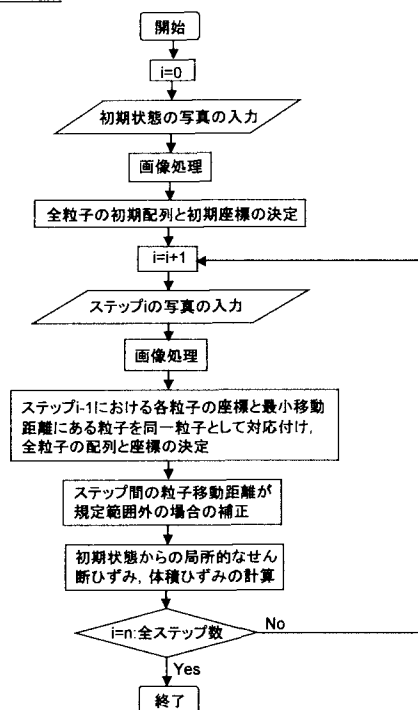


図 1: 画像解析による局所ひずみ計算の流れ

$$\gamma = \sqrt{e_{ij}e_{ij}}, \quad \varepsilon_v = \varepsilon_{kk} \quad i, j, k = 1, 2 \quad (2 \text{ 次元平面成分のみ考慮})$$

ここに、 e_{ij} は偏差ひずみであり、 $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - (\varepsilon_v/2) \cdot \delta_{ij}$ 、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタ、である。

4. 実験結果 図 2 は各試験ケースの供試体側面部で観察される局所的なせん断ひずみと体積ひずみの分布である。実験では軸ひずみ 0.5% おきに写真撮影をし、局所ひずみ分布の計測を行っているが、本報では紙面の都合により軸ひずみ 4% ごと のデータを示している。また、その撮影は供試体の 2 側面で行っているが、いずれの側面でも、定性的にも定量的にもほぼ同じ分布となったために、今回はその中の 1 側面での観察記録だけを示している。

せん断ひずみの分布に着目すると、50% までをグレースケールのコンターで表したこの図で見る限り、Loose の CU-1 を除いて、供試体の 4 隅から局所化したせん断ひずみを観察することができる。その局所化の集中度合いは相対密度の増加につれて大きくなり、CU-3 および CU-4 では明確に X 型に局所化した分布が現れている。この X 型のせん断ひずみの集中帯は、最終的にはほぼひとつに収斂しているが、軸ひずみ 12% のコンター図を見ると、はじめは上下端部から 2 つの X 型のせん断ひずみの集中帯が発生し、せん断が進行するにつれて 2 つが重なり、より大きなせん断ひずみとなったことがわかる。一方、相対密度が小さい CU-1 や CU-2 ではせん断ひずみの分布は曖昧なものとなり、特に CU-1 では供試体中央付近のせん断ひずみが周辺部よりも大きいという程度に留まっている。また、CU-1 および CU-2 のせん断ひずみ分布に水平の帯があるが、これはせん断が進行するにつれて発生したメンブレンのたるみのためであるが、このたるみの発生から、相対密度が小さいほど、鉛直方向の軸圧縮ひずみが卓越していることがわかる。

体積ひずみ分布に着目すると、相対密度が大きいほど、供試体端部では体積圧縮をし、中心部で膨張していることがわかり、供試体上下方向に不均一な圧縮変形をしている。Loose の CU-1 においては、構造的に圧縮性が大きいことを反映し、ほぼ全域で体積圧縮しているが、やはり供試体上部ほど圧縮が大きいことがわかる。CU-2 および CU-3 においては、せん断ひずみの局所化が観察された位置の近傍に、斜めに体積ひずみが集中している部分が見られる。特に CU-3 においては、圧縮と膨張が隣接しており、圧縮ひずみが卓越しているごく近傍では、逆に膨張する部分が見られる。

5. まとめ ゆるづめ構造を持つ砂の角柱三軸試験を行い、PTV 画像解析により供試体表面のせん断ひずみおよび体積ひずみ分布を可視化した結果、相対密度が大きくなるほど、せん断ひずみの局所化の度合いが大きくなる一方で、供試体上下方向には不均一な圧縮変形が見られることがわかった。

参考文献 1) 辻・岡・小高・谷崎：細粒分を含むゆる詰め砂の変形パターンと圧縮帯，第 38 回地盤工学研究発表会概要集，435-436，2003。
2) 岡・小高・辻・谷崎：石膏混じりゆる詰め砂における圧縮帯の観察，第 38 回地盤工学研究発表会概要集，433-434，2003。
3) 市之瀬・岡・小高・里村：角柱供試体を用いた正規及び過圧密粘土の三軸試験によるひずみの局所化の観察，第 38 回地盤工学研究発表会概要集，183-184，2003。
4) 里村・岡・小高・木元・肥後・市之瀬：粘土角柱供試体を用いた三軸圧縮試験とその有限要素シミュレーション，第 38 回地盤工学研究発表会概要集，183-184，2003。
5) 北原・岡・小高・市之瀬：PTV 画像解析によるひずみの局所化の観察，第 39 回地盤工学研究発表会概要集，2004。
6) 可視化情報学会編：PIV ハンドブック，森北出版，2002。

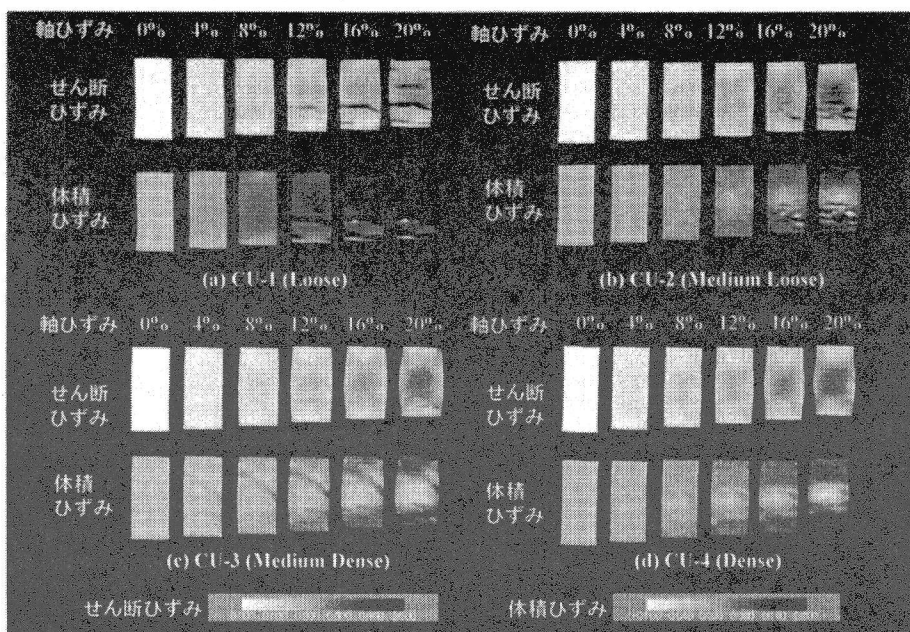


図 2: 供試体側面部で観察される局所的なせん断ひずみと体積ひずみの分布